干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000－6060.2018.05.12

利用树木年轮重建公元1639—2013年青南高原5～9月相对湿度变化①

黄小梅[1]， 肖丁木[1,2]， 秦宁生[1,3]

（1 中国气象局成都高原气象研究所/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室,四川 成都 610072； 2 四川省气象台,四川 成都 610072； 3 四川省气候中心,四川 成都 610072）

摘 要： 利用采集自青海省杂多县昂赛乡分布的大果圆柏建立树轮宽度差值年表(*RES*)。相关分析结果表明:青南高原5～9月平均大气相对湿度与树轮宽度差值年表具有显著的正相关关系,相关系数达0.65(建模期,1969—2013年)。利用差值年表重建了青南高原过去375 a的5～9月平均相对湿度变化序列,重建方程方差解释量达42.3%,且方程稳定。在重建的375 a中,显著的偏湿阶段有5个:1694—1710年、1753—1778年、1830—1847年、1892—1908年和1978—1989年;显著的偏干阶段有8个:1646—1673年、1682—1693年、1711—1731年、1735—1752年、1796—1809年、1817—1829年、1848—1861年和1873—1886年。采用多窗谱分析(MTM)发现,重建序列具有28～30 a的长周期,6～9 a和2～5 a的短周期。此次重建序列与其他一些能反映青藏高原地区干湿状况的树轮重建序列在低频上存在较好的一致性,而且与同期相关格点夏季帕尔默干旱指数(*MADA*)在公共区间(1639—2005年)的相关系数达0.489($P<0.001$, $n=367$),进一步证明了本文重建序列的准确性。

关 键 词： 青南高原；树轮宽度差值年表；相对湿度；重建

中图分类号： P467 **文献标识码：** A **文章编号：**

青藏高原是世界上海拔最高的大地形区域,其平均海拔在4 000 m以上,享有“世界屋脊”和“第三极”之称。作为全球气候变化的高敏感区之一,它不仅自身具有显著的气候变化信号,其热力和动力作用亦对下游的中国东部季风气候乃至全球大气环流和气候产生显著影响[1－6]。在几十年时间尺度上青藏高原往往表现为东亚地区气候变化的启动区[7],因此,研究青藏高原历史时期气候变化具有非常重要的意义,并受到气象学者的高度重视[8－9]。

青海南部高原(下称青南高原)位于青藏高原东北部,平均海拔3 500 m以上,地域辽阔、地形复杂,是青藏高原大地形的重要组成部分,也是我国主要河流长江、黄河、澜沧江的发源地。然而由于地势及环境条件恶劣等诸多问题,导致这里气象台站分布稀疏、观测资料较短,因此采用器测资料研究该区域气候变化及成因受到很大限制。随着树轮气候学的发展,利用树轮资料(宽度、密度、同位素等)变异对气候变化的响应,获取某些气候要素的代用资料,已经在全球范围内得到广泛应用[10－12]。关于青南高原地区树轮序列的重建工作也逐渐展开。秦宁生等[13－14]利用曲麻莱、治多的树轮指数重建了青南高原453 a春季湿润指数和最高气温,时兴合等[15]重建了青海杂多地区5～6月干燥度指数,秦宁生等[16]重建了长江源区通天河流域年径流量,LIANG等[17]重建了长江源区夏季最低气温,叶秣麟等[18]重建了黄河源区5～6月最高气温序列,这些研究成果为青南高原地区历史气候变化研究提供了重要的基础资料。

由于大气相对湿度是关系到整个大气水汽循环和能量平衡的重要因素之一,研究相对湿度的变化对于更好地理解过去气候变化具有重要意义。然

① **收稿日期：** 2018－04－04； **修订日期：** 2018－08－11
基金项目： 国家自然科学基金(41772173);中国沙漠气象科学研究基金(Sqj2016002)
作者简介： 黄小梅(1987－),女,助理研究员,硕士,主要研究方向为青藏高原气候变化和气候诊断. E-mail:hxmlovely@163.com
通讯作者： 秦宁生. E-mail:qinns0515@163.com

而,由于青南高原地势和环境条件恶劣,器测资料短缺,且目前针对该区的树轮重建研究主要是温度、降水和径流变化方面,而对于其他气候指标,如大气相对湿度、湿润指数,干燥指数等重建方面仍嫌不足。为了更加全面和透彻地研究青南高原地区的气候特征,对除温度和降水的其他气候要素进行重建也非常重要。因此,本研究在以往的研究基础上基于青海省杂多县昂赛乡的大果圆柏树轮样本,重建了青南高原地区过去 375 a 的 5 ~ 9 月平均大气相对湿度变化序列,并探讨了相对湿度变化特征。以期为研究青藏高原历史气候变化规律提供新的基础资料,为我国政府决策部门有效地管理和利用三江源区水资源提供科学支持。

1 资料与方法

1.1 树轮资料采集及年表研制

样品采集于 2013 年 9 月,采样点位于青海省杂多县昂赛乡(AS,95°37.765′ E,32°42.856′ N,图 1)。现场采集的树种为大果圆柏,主要生长在海拔 3 992 ~ 4 092 m,坡度为 30° ~ 40°左右的南坡上。采样区海拔较高,受人类活动影响较小,因此采集的样本可能含有较多的自然环境及气候变化信息。按照国际树木年轮数据库的标准,利用生长锥共对 28 棵树进行了树芯采集,为保证能通过多个树芯间的交叉定年识别伪轮或者缺轮,以及利于树芯的定年,在采样时对某些树采集了 2 个以上的树芯,一共得到 56 个树芯。

树轮样本的预处理及轮宽测量在中国科学院地理科学与资源研究所树轮实验室进行。为确保树轮资料的可靠性和适用性,样本预处理按目前国际通用的基本程序,对所采样芯进行自然干燥、固定、磨光和交叉定年。利用 COFECHA 程序[19]对交叉定年结果进行质量控制,剔除了奇异点过多和与主序列之间相关性较差的个别样本。然后,用 ARSTAN 程序[20]建立树轮宽度指数年表。本研究中生长趋势的拟合主要采用样本长度为 100 的样条函数拟合的方法,对个别生长趋势不符合上述函数曲线的样芯宽度序列采用负指数函数和 Hugershoff 曲线[21]进行分别拟合,最后将拟合后的各个序列用双权重平均法合成得到该采样点上的树轮宽度标准化年表(*STD*)、差值年表(*RES*)和自回归年表(*ARS*),以增加在气候重建时的年

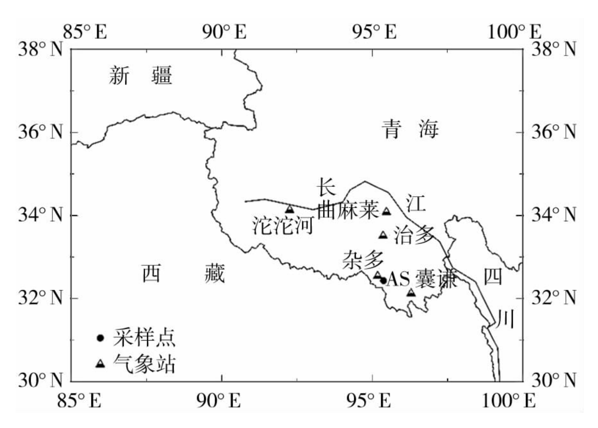


图 1 树轮采样点、气象站位置分布

Fig. 1 Location of tree-ring sampling sites and meteorological stations

表 1 树轮差值年表统计特征

Tab. 1 Statistical characteristics of residual tree-ring chronology

SSS > 0.85 的起始年 / 样芯数	平均敏感度	平均树间相关系数	信噪比	样本量总体代表性 (*EPS*)	第一主成分方差解释量
1639/9	0.28	0.37	33.22	0.97	44.9%

表可选择性。为尽可能多的保留气候信息,本文采用 *RES* 年表进行分析(表 1)。选择子样本信号强度(SSS)大于 0.85 的时段为起始年代,可靠时段为 1639—2013 年。

1.2 气象资料选取

在分析树轮宽度指数序列对气候变化的响应时,气象资料的选取需满足两个条件:一是气象数据要有一定的跨度,以保证重建回归方程的可靠性;二是所选气象站点要和采样点属于同一气候区,以保证气象资料的代表性[22]。我们选取了离采样点较近的 5 个气象站点,分别为杂多(95°18′ E,32°54′ N,海拔 4 066 m)、治多(95°36′ E,33°51′ N,海拔 4 181m)、囊谦(96°29′ E,32°12′ N,海拔 3 644 m)、曲麻莱(95°47′ E,34°08′ N,海拔 4 175 m)和沱沱河(92°26′ E,34°13′ N,海拔 4 533 m)。同时为检验气象站点与采样点是否属于同一气候区,对各站点的主要气候要素采用了 Mann-Kendell 方法和 double - mass analysis 方法进行均一性检验[23-24],结果显示各站各气候要素具有很好的均一性。本文采用 5 个气象站平均的气候要素值代表区域气候要素值,由于各站均存在着不同程度的缺测,选择公共时段为 1969—2013 年。

2 结果与分析

2.1 树木径向生长与大气相对湿度的关系

相对湿度的大小反映了空气中水蒸汽含量的多少。对于植物—土壤—大气统一体而言,大气相对湿度与土壤湿度及树木生长密切相关。为了探讨青南高原树木径向生长状况对大气相对湿度变化的响应,本文利用采样点附近5个气象站(杂多、治多、囊谦、曲麻莱、沱沱河)月平均相对湿度资料,取上年10月~当年9月各种顺序组合与树轮宽度年表进行相关分析。结果表明,区域平均相对湿度与树轮宽度年表间存在显著的正相关关系,其中相关性最好的是差值年表(*RES*)。从单月相关分析(图2)表明:*RES*与整个生长季的相对湿度都有较好的相关性,其中以6月的相关系数最高($r=0.61$, $P<0.001$);组合相关结果表明,与5~9月平均的相对湿度相关性最好,相关系数达0.65($P<0.001$)。因此,青南高原地区大果圆柏的径向生长对大气相对湿度的响应较为敏感。从植物生理学角度来说,大气相对湿度通过直接控制植物叶片的气孔导度,从而影响植物蒸腾作用与光和作用的速率[25-26]。由于研究区处于半干旱地区,在树木生长季,5~9月气温回暖,树木形成层细胞分裂活动旺盛,而该时期充足的水分供应有助于植物光合作用,从而使细胞分裂及细胞壁的加厚,有利于树木径向生长,产生宽轮。

2.2 相对湿度的重建与检验

以相关性、重建方程的可靠性、植物生理学意义为标准,在众多相关性好的时段中选取青南高原$RH_{5\sim9月}$作为重建对象。该时段*RH*与差值年表(*RES*)具有显著的相关性,最高相关系数达到0.65。依据1969—2013年$RH_{5\sim9月}$(y)和*RES*(x),采用线性回归的方法构建的回归方程如下:

$$RH_{5\sim9月}=6.32RES+58.58$$

式中:$RH_{5\sim9月}$代表5~9月青南高原区域平均的大气相对湿度;*RES*代表树轮年表宽度指数序列。重建方程的相关系数为0.65,通过了0.01的显著性水平检验,方差解释量为42.3%,调整方程解释量为40.9%,*F*检验值为31.50。采用逐一剔除法对方程进行检验,检验的各统计量列于表2。结果表明,误差缩减值($RE=0.35$)、乘积平均值($t=2.21$)以及*F*检验值($F=31.50$)都达到了0.01的显著性水平;符号检验和一阶差检验分别通过了0.01和0.05的显著性水平检验,以上统计量均表明了重建方程稳定。通过比较1969—2013年5~9月平均相对湿度的实际值与重建值(图3),发现重建序列的高(低)频变化与实际值均能较好的对应。进一步表明本次重建模型可靠合理。

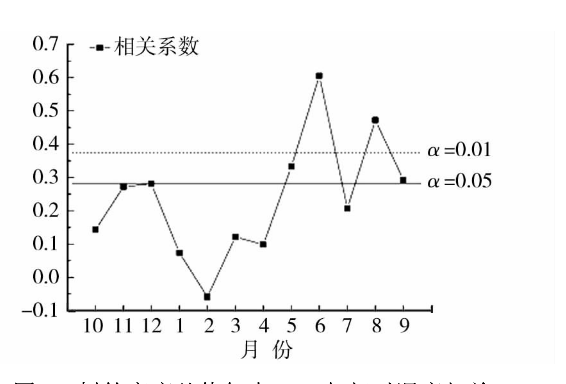


图2 树轮宽度差值年表*RES*与相对湿度相关

Fig. 2 Relation of tree-ring data with relative humidity

2.3 近375 a相对湿度变化特征

根据上述回归方程重建了研究区1639—2013年5~9月平均大气相对湿度变化序列(图4),重建时段的平均值为64.82,标准差为1.32。这里定义:相对湿度高于$+1\sigma$($+2\sigma$)的年份为湿润(极端湿润)年,反之低于-1σ(-2σ)的年份为干旱(极端干旱)年。在过去的375 a中,研究区的湿润年和干旱年,分别有58个和52个,分别占总年份数的15.5%和13.9%。极端湿润年份有5 a,分别为1640、1699、1703、1704年和1873年;极端干旱年份有12 a,分别为1689、1700、1724、1727、1739、1749、1872、1910、1942、1953、1995年和1998年,主要集中在18世纪前半期和20世纪中后期。

为分析重建序列的年代际变化特征,通过对重

表2 转换方程和交叉检验的统计量

Tab. 2 Statistical parameters of the transfer function and cross-validation

方差解释量 R^2	方差解释量调整值 R^2_{adj}	一阶差符号检验	符号检验	乘积平均值 t	F 值	误差缩减值 RE
42.3%	40.9%	31(29[a],31[b])	30(30[a],32[b])	2.21	31.50	0.35

注:a表示达到0.05显著性所需同号数;b表示达到0.01显著性所需同号数

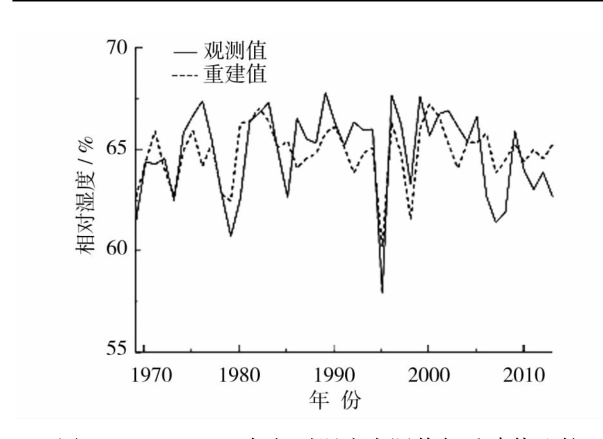


图 3　1969—2013 年相对湿度实际值与重建值比较

Fig. 3　Comparison of recorded and reconstructed relative humidity for common period from 1969 to 2013

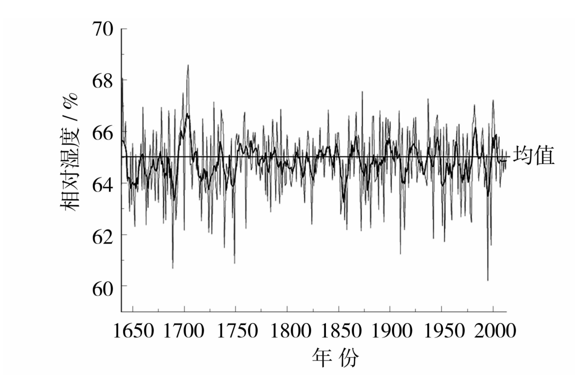


图 4　重建相对湿度序列(细线)、11 a 滑动平均(粗线)和平均值

Fig. 4　Reconstructed relative humidity of the southern Qinghai Plateau region over the past 375 years (thin line), the 11 a moving average(thick line), and straight line for the averaged

建序列进行 11 a 滑动平均处理后,定义连续 11 a 以上相对湿度高于均值的时段为湿润时期,连续 11 a 以上低于均值的时段为干旱时期,发现相对于平均值偏湿的持续阶段有 5 个(1694—1710、1753—1778、1830—1847、1892—1908 年和 1978—1989 年);偏干的持续阶段有 8 个(1646—1673、1682—1693、1711—1731、1735—1752、1796—1809、1817—1829、1848—1861 年和 1873—1886 年)。最长的偏湿时段为 1753—1778 年,持续 26 a;最长的偏干时段为 1646—1673 年,持续 28 a。

周期分析可以更好地了解和预测区域气候在大尺度气候背景下的变化规律。这里采用多窗谱分析方法[27](MTM)对重建的青南高原相对湿度序列进行周期分析。结果表明,重建序列存在 28 ~ 30 a、6 ~ 9 a 和 2 ~ 5 a 左右的显著变化周期。2 ~ 5 a 左右的周期振荡可能是受"准 2 a 振荡"和"准 3 a 振荡"影响,即受赤道地区平流层的 26 ~ 30 个月为周期的西向风和东向风之间的不断转换形成的准 2 a 和准 3 a 周期振荡[27-28]。而 6 ~ 9 a 左右的周期可能受 ENSO 周期影响[29]。

3　与其他重建结果的对比

为进一步验证重建序列的准确性和稳定性,将本研究中重建序列与青南高原几条具有代表性的干湿指数重建序列进行比较(图 5),对比序列包括:秦宁生等[13]重建的青海南部高原春季(4 ~ 6 月)湿润指数序列,时兴合等[15]重建的青海杂多 5 ~ 6 月干燥度指数序列,秦宁生等[16]重建的长江源区通天河流域年径流量序列。上述序列的重建区域均在青海南部高原内,且距离此次采样点较近,具有较高可比

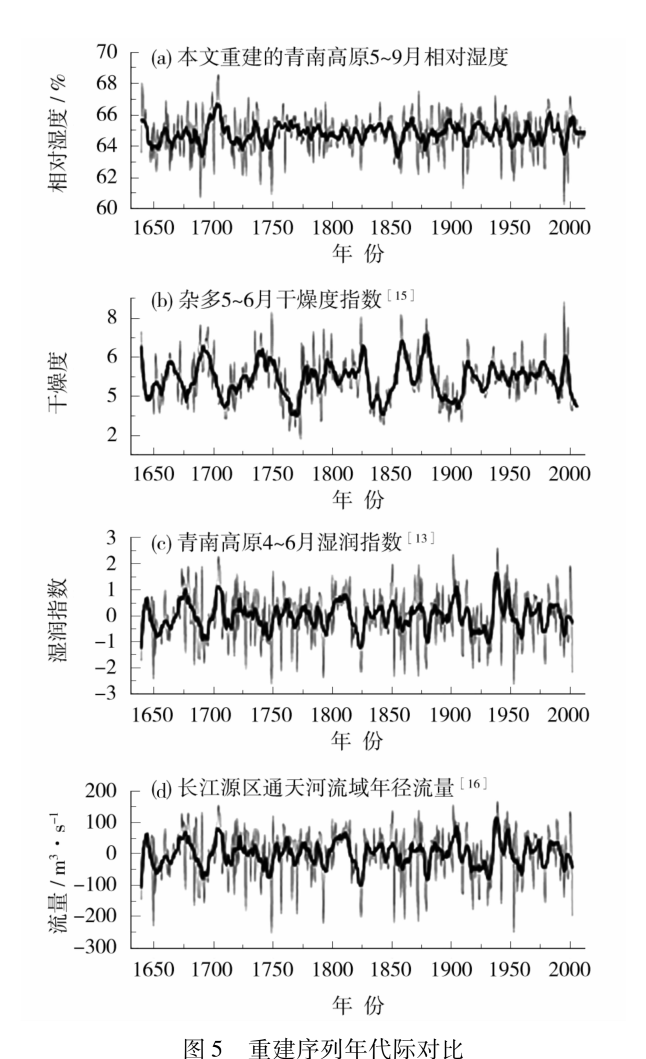


图 5　重建序列年代际对比

Fig. 5　Interdecadal comparision between the reconstructed relative humidity sequence in the study and those in previous studies

性。通过相关分析发现,本文重建序列与 3 个对比重建序列之间的相关系数都达到了 0.001 的显著性水平。其中与距离采样点最近的杂多 5 ~6 月干燥度指数存在非常好的负相关($r = -0.56, P < 0.001, n = 368$),与青南高原 4 ~6 月湿润指数也具有显著正相关($r = 0.46, P < 0.001, n = 364$),与长江源区通天河流域年径流量相关系数达 0.47($P < 0.001, n = 364$),说明,4 条重建序列在年际尺度变化上有较好的一致性。

对原始序列做 11 a 的低通滤波处理后(图 5),发现 4 条曲线都能反映 18 世纪 10 年代、19 世纪 30 ~40 年代、19 世纪 90 年代末至 20 世纪初的偏湿时段和 17 世纪 60 年代、17 世纪 80 年代末至 90 年代初、18 世纪 30 ~40 年代、19 世纪 20 年代、20 世纪 50 年代中后期的偏干时段。虽然 4 条重建序列之间也存在一些干湿变化不同的时期(这些差异可能是由于重建所用年表、重建时段或者采样点小环境等存在差异引起的)。但总体来说,在公共时段内(1644—1997 年)重建的 5 ~9 月青南高原相对湿度指数与青海杂多 5 ~6 月干燥度指数、青南高原春季湿润指数、通天河流域年径流量所指示的干湿状况年代际变化趋势较为一致。这说明青南高原地区干湿历史变化具有很强的一致性。

将此次重建序列与青藏高原其他地区的树轮重建序列进行对比,本文年代际干湿时期变化也可以得到一定的证实。例如,本序列中几个偏干旱时段(1735—1752 年、1873—1886 年)和偏湿润时段(1892—1908 年和 1978—1989 年)与邢佩等[28]在青藏高原东北部重建的 5 ~6 月 PDSI 重建序列里较明显的干旱时段和湿润时段较为一致。本序列中几个偏干旱时段(1817—1829、1848—1861 年和 1873—1886 年)也与青藏高原东北部已有的树轮年表显示的树木低生长时段[29]相对应。1817—1829 年的持续低生长阶段在都兰[30]、乌兰[31]、藏东南[32]地区的树轮宽度序列中均有所体现。此次重建的青南高原相对湿度与青藏高原地区其他相关序列之间的一致性,不仅证明了重建序列的可靠性,还表明研究区干湿变化在低频上对大空间尺度气候变化的响应具有一定区域代表性。

另外,将此次相对湿度重建序列与 COOK 等[33]的 MADA (Monsoon Asia drought atlas,亚洲地区夏季帕尔默干旱指数)格点重建数据(6 ~8 月)作比较,计算了公共时段(1639—2005 年)本文重建的相对湿度序列与 MADA 中青南高原采样点距离较近格点重建数据的相关系数,发现涉及的两个格点(93.75°E,33.75°N),(96.25°E,33.75°N)相关系数分别为 0.488、0.391($P < 0.001, n = 367$),从而进一步证明了此次重建序列的准确性。

相对湿度的大小反映了空气中水汽含量的多少,其值越大(小),水汽含量越大(小)[34]。由于青南高原地区主要降水集中在春夏季节(6 ~9 月),因而 5 ~9 月平均相对湿度较大(小)的年份易发生涝(旱)灾。根据《中国气象灾害大典 - 青海卷》记载 1646—1673、1711—1731、1735—1752、1796—1809、1817—1829、1848—1861 年和 1873—1886 年的干旱时段在历史记录中均有所体现,特别是 1735—1752 年和 1848—1861 年,记载的旱灾都分别达 6 次,而且在 1873—1886 年期间,1876—1879 年青海遭受了连续 4 a 旱灾[35];1694—1710、1753—1778、1830—1847、1892—1908 年和 1978—1989 年的湿润时段也在历史灾害资料中有所体现,记录洪涝事件最多的是在 1753—1778 年和 1830—1847 年这两个时期,分别达 10 次和 11 次之多[35]。

4 结 论

(1) 利用采集自青海省杂多县昂赛乡的大果圆柏建立树轮宽度差值年表。通过相关分析发现青南高原 5 ~9 月的大气相对湿度与树轮宽度差值年表(*RES*)具有良好的相关性,相关系数达到 0.65(建模期,1969—2013 年)。基于树轮宽度差值年表重建了青南高原 1639—2013 年的 5 ~9 月平均大气相对湿度变化序列。重建方程方差解释量达 42.3%,且方程稳定可靠。

(2) 在过去 375 a 间,青南高原地区 $RH_{5\sim9月}$ 指数先后经历了 5 个偏湿阶段和 8 个偏干阶段。偏湿的持续阶段为:1694—1710、1753—1778、1830—1847、1892—1908 年和 1978—1989 年;偏干的持续时段为:1646—1673、1682—1693、1711—1731、1735—1752、1796—1809、1817—1829、1848—1861 年和 1873—1886 年。最长的偏湿时段是 1753—1778 年,持续 26 a;最长的偏干时段是 1646—1673 年,持续 28 a。极端湿润年份有 5 a,分别为 1640、1699、1703、1704 年和 1873 年;极端干旱年份有 12 a,分别为 1689、1700、1724、1727、1739、1749、1872、1910、1942、1953、1995 年和 1998 年。

（3）利用多窗谱分析发现，重建的青南高原地区 $RH_{5\sim9月}$ 序列具有 28～30 a、6～9 a 和 2～5 a 左右的显著周期变化。2～5 a 左右的变化周期振荡可能是受“准 2 a 振荡”和“准 3 a 振荡”影响，即受赤道地区平流层的 26～30 个月为周期的西向风和东向风之间的不断转换形成的准 2 a 和准 3 a 周期振荡。而 6～9 a 左右的周期可能是受 ENSO 周期影响。重建序列的周期变化体现了 ENSO 和赤道平流层东西风的周期振荡可能对青南高原干湿变化产生重要影响。

（4）此次相对湿度重建序列与另外 3 条具有代表性的青南高原地区干湿指数重建序列都能反映 18 世纪 10 年代、19 世纪 30～40 年代、19 世纪 90 年代末～20 世纪初的偏湿时段和 17 世纪 60 年代、17 世纪 80 年代末～90 年代初、18 世纪 30～40 年代、19 世纪 20 年代、20 世纪 50 年代中后期的偏干时段。虽然 4 条序列之间也存在一些干湿变化不同的时期（这些差异可能是由于重建所用年表、重建时段或者采样点小环境等存在差异引起的）。但总体来说，在公共时段内，4 条重建序列指示的干湿状况年代际变化趋势较为一致。此外，本文重建序列还与青藏高原东北部其他一些干湿重建序列或树轮序列在低频上存在较好的一致性，这不仅证明了此次重建序列的可靠性，还表明该区的干湿变化在低频上对大空间尺度气候变化的响应，具有一定的区域代表性。

参考文献（References）

[1] MANN Michael E, BRADLEY Raymond S, HUGHES Malcolm K. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries[J]. Nature, 1998, 392(6678): 779－787.

[2] 陈贝，吴涧. 青藏高原热力异常对四川省及周边区域气象要素影响分析[J]. 高原山地气象研究，2010，30（3）：1－11.［CHEN Bei, WU Jian. Analysis on the influence of Tibetan Plateau thermal anomalies to meteorological elements in Sichuan and neighboring areas [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2010, 30(3): 1－11.］

[3] ZHAO P, YANG S, YU R C. Long-term changes in rainfall over Eastern China and large-scale atmospheric circulation associated with recent global warming[J]. Journal of Climate, 2010, 23(6): 1544－1562.

[4] 王荣英，周顺武，闫巨盛，等. 近 30 年青藏高原上空大气温度变化特征[J]. 高原山地气象研究，2011，31（1）：1－5.［WANG Rongying, ZHOU Shunwu, YAN Jvsheng, et al. Analysis of temporal and spatial characteristics about upper-air temperature over Tibetan Plateau during last 30 years[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2011, 31(1): 1－5.］

[5] 郑飒飒，李跃清，齐冬梅，等. 青藏高原夏季风对长江中下游气候的影响及与南亚高压的联系[J]. 高原山地气象研究，2014，34（2）：30－38.［ZHENG Sasa, LI Yueqing, QI Dongmei, et al. The impact of Tibetan Plateau summer monsoon on the climate of the Yangtze River Basin and contact with South Asia[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2014, 34(2): 30－38.］

[6] 胡超，张鹏飞. 两种厄尔尼诺类型期高原地区大气环流的对比分析[J]. 高原山地气象研究，2015，35（4）：50－55.［HU Chao, ZHANG Pengfei. Analysis of contrast between two atmospheric circulations at plateau section during the period of El-Nino [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2015, 35(4): 50－55.］

[7] 汤懋苍，李存强，张建. 青藏高原及其四周的近代气候变化[J]. 高原气象，1988，7（1）：39－49.［TANG Maocang, LI Cunqiang, ZHANG Jian. The climate change of Qinghai-Xizang Plateau and its neighbourhood[J]. Plateau Meteorology, 1988, 7(1): 39－49.］

[8] LIU X D, CHEN B D. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades[J]. International Journal of Climatology, 2000, 20(14): 1729－1742.

[9] THOMPSON L G, YAO T D, DAVIS Mary E, et al. Tropical climate instability: The last glacial cycle from a Qinghai Tibetan ice core[J]. Science, 1997, 276(5320): 1821－1825.

[10] BRIFFA K R, OSBORN T J, SCHWEINGRUBER F H, et al. Low-frequency temperature variations from a northern tree ring density network[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(D3): 2929－2941.

[11] MANN M E, BRADLEY R S, HUGHES M K. North Hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations[J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(6): 759－763.

[12] 秦宁生，时兴合，邵雪梅，等. 川西高原树木年轮所指示的平均最高气温变化[J]. 高原山地气象研究，2008，28（4）：18－24.［QIN Ningsheng, SHI Xinghe, SHAO Xuemei, et al. Average maximum temperature change recorded by tree rings in West Sichuan Plateau[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2008, 28(4): 18－24.］

[13] 秦宁生，邵雪梅，时兴合，等. 青南高原树轮年表的建立及与气候要素的关系[J]. 高原气象，2003，22（5）：445－450.［QIN Ningsheng, SHAO Xuemei, SHI Xinghe, et al. Tree-ring chronology in southern Qinghai and its relation to climatic element[J]. Plateau Meteorology, 2003, 22(5): 445－450.］

[14] 秦宁生，邵雪梅，靳立亚，等. 青海南部高原圆柏年轮指示的近 500 年来气候变化[J]. 科学通报，2003，48（19）：2068－2072.［QIN NingSheng, SHAO Xuemei, JIN Liya, et al. Climate change over southern Qinghai Plateau in the past 500 years recorded in *Sabina tibetica* tree rings[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(19): 2068－2072.］

[15] 时兴合，秦宁生，邵雪梅，等. 青海杂多圆柏年轮指示的近 700

年旱涝变化[J]. 高原气象,2009,28(4):769 - 776. [SHI Xinghe, QIN Ningsheng, SHAO Xuemei, et al. The drought and flood signals in recent 700 years indicated by long tree-rings of *Sabina tibetica* in Zaduo of Qinghai Province[J]. Plateau Meteorology, 2009,28(4):769 - 776.]

[16] 秦宁生,靳立亚,时兴合,等. 利用树轮资料重建通天河流域 518 年径流量[J]. 地理学报,2004,59(4):550 - 556.[QIN Ningsheng, JIN Liya, SHI Xinghe, et al. A 518-year runoff reconstruction of Tongtian River Basin using tree-ring width chronologies [J]. Acta Geographica Sinica,2004,59(4):550 - 556.]

[17] LIANG E Y, SHAO X M, QIN N S. Tree-ring based summer temperature reconstruction for the source region of the Yangtze River on the Tibetan Plateau[J]. Global and Planetary Change,2008,61 (3 - 4):313 - 320.

[18] 叶秣麟,秦宁生,白爱娟,等. 利用树轮宽度重建黄河源区 1618—2009 年 5 ~ 6 月最高气温[J]. 气候变化研究进展, 2015,11(2):86 - 92.[YE Molin, QIN Ningsheng, BAI Aijuan, et al. Using tree-ring width to reconstruct the maximum air temperature of Yellow River source region in May—June over 1618—2009 [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis,2015,11(2): 86 - 92.]

[19] HOLMES R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement[J]. Tree-Ring Bulletin,1983,44(3):69 - 75.

[20] COOK E R. A time series analysis approach to tree-ring standardization[D]. Tucson: The Ph. D Dissertation of University of Arizona,1985.

[21] FANG K Y, GOU X H, PETERS K, et al. Removing biological trends from tree-ring series: Testing modified hugershoff curves [J]. Tree-Ring Research,2010,66(1):51 - 59.

[22] 王梦麦,戴君虎,白洁,等. 利用树木年轮重建六盘山地区 1900 年以来的干湿变化[J]. 古地理学报,2009,11(3):355 - 360. [WANG Mengmai, DAI Junhu, BAI Jie, et al. Reconstruction of humidity changes from tree rings in Liupan Mountains area since 1900[J]. Journal of Palaeogeography,2009,11(3):355 - 360.]

[23] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999: 1 - 275. [WEI Fengying. Modern weather forecasting techniques and statistical diagnosis[M]. Beijing: China Meteorological Press,1999:1 - 275.]

[24] KOHLER M A. On the use of double-mass analysis for testing the consistency of meteorological records and for making required adjustment[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1949,30(1):188 - 189.

[25] GUEHL J M, AUSSENAC G. Photosynthesis decrease and stomatal control of gas exchange in *Abies alba* Mill. in response to vapor pressure difference[J]. Plant Physiology,1987,83(2):316 - 322.

[26] LANG E Y, ECKSTEIN D, LIU H Y. Climate-growth relationships of relict *Pinus tabulaeformis* at the northern limit of its natural distribution in northern China[J]. Journal of Vegetation Science, 2008,19(3):393 - 406.

[27] MANN M E, LEES J M. Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series[J]. Climatic Change,1996, 33(3):409 - 445.

[28] 邢佩. 青藏高原树轮气候重建与中国东部树种的树轮气候学评价——以青海三江源、西藏昌都和浙江古田山地区为例[D]. 北京:中国科学院大学博士论文,2013.[XING Pei. Climate reconstruction on the Qinghai-Tibetan Plateau based on tree ring and dendroclimatological evaluation of tree species in eastern China: A case study in Sanjiangyuan region of Qinghai, Changdu prefecture of Tibet and Gutian mountain of Zhejiang[D]. Beijing: The Ph. D Dissertation of University of Chinese Academy of Sciences,2013.]

[29] GOU X H, CHEN F H, JACOBY G, et al. Rapid tree growth with respect to the last 400 years in response to climate warming, northeastern Tibetan Plateau[J]. International Journal of Climatology, 2007,27(11):1497 - 1503.

[30] ZHANG Q B, CHENG G D, YAO T D, et al. A 2,326-year tree-ring record of climate variability on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(14): 1739.

[31] HUANG J G, ZHANG Q B. Tree rings and climate for the last 680 years in Wulan area of northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Climatic Change,2007,80:369 - 377.

[32] LIANG E Y, SHAO X M, XU Y. Tree-ring evidence of recent abnormal warming on the southeast Tibetan Plateau[J]. Theor Appl Climatol,2009,98:9 - 18.

[33] COOK E R, ANCHUKAITIS K J, BUCKLEY B M, et al. Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium[J]. Science,2010,328(5977):486 - 489.

[34] 吕军,屠其璞,钱君龙,等. 利用树木年轮稳定同位素重建天目山地区相对湿度序列[J]. 气象科学,2002,22(1):47 - 51. [LV Jun, TU Qipu, QIAN Junlong, et al. Relative humidity series reconstructed by using stable isotopes in tree ring of Tianmu Mountain[J]. Scientia Meteorologica Sinica,2002,22(1):47 - 51.]

[35] 温克刚,王莘. 中国气象灾害大典 - 青海卷[M]. 北京:气象出版社,2006:1 - 200. [WEN Kegang, WANG Xin. Chinese meteorological disasters encyclopedia: Qinghai volume[M]. Beijing: China Meteorological Press,2006:1 - 200.]

Tree-ring based reconstruction of relative humidity from May to September in southern Qinghai Plateau during AD 1639—2013

HUANG Xiao-mei[1], XIAO Ding-mu[1,2], QIN Ning-sheng[1,3]

(1 *Chengdu Institute of Plateau Meteorology, CMA / Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu* 610072, *Sichuan, China*;

2 *Sichuan Provincial Meteorological Observatory, Chengdu* 610072, *Sichuan, China*;

3 *Climate Center of Sichuan Province, Chengdu* 610072, *Sichuan, China*)

Abstract: The study of relative humidity is important to understand better the past climatic variations. However, there have been few long-term humidity reconstructions using tree-ring widths worldwide. In this paper, we established a reconstruction of mean relative humidity from May to September from AD 1639 to 2013 using *Sabina tibetica* Kom from the southern Qinghai Plateau region in the northeastern Tibetan Plateau, China. In total, there were 56 tree cores from 28 trees collected at Angsai Township of Zaduo County of Qinghai Province (AS, 95°37.765′ E, 32°42.856′ N). All samples were surfaced, cross-dated and measured according to standard dendrochronology techniques. The reconstructed equation was stable and reliable and its variance interpretation quantity reached 42.3%. In the past 375 years, there were five wet periods (1694—1710, 1753—1778, 1830—1847, 1892—1908, and 1978—1989) and eight dry periods (1646—1673, 1682—1693, 1711—1731, 1735—1752, 1796—1809, 1817—1829, 1848—1861 and 1873—1886) in the reconstructed humidity sequence. The longest wet period is 1753—1778 (26 years), and the longest dry period is 1646—1673 (28 years). There were 12 extremely dry years: 1689, 1700, 1724, 1727, 1739, 1749, 1872, 1910, 1942, 1953, 1995 and 1998; and 5 extremely wet years: 1640, 1699, 1703, 1704 and 1873. The multi-taper method (MTM) spectral analysis indicates that there are 3 periodic changes of 28 –30 a, 6 –9 a, 2 –5 a. The 2 –5 a cycle may be related to the Quasi-biennial and Southern Oscillations influenced by the constant change between east wind and west wind in the equatorial stratosphere in a cycle of 26 –30 months. The 6 –9 a cycle may be related to ENSO. By comparing the reconstructed sequence from this study with a few typical reconstructed series which can reflect the status of dry and wet in the Southern Qinghai Plateau, it is found that there were four curves which shared the same wet periods (1710s, 1830s—1840s and 1890s—1900s) and drought periods (1660s, 1680s—1690s, 1730s—1740s, 1820s and 1950s) at an inter-annual scale. The result shows that these series presented good consistency on the change of low frequency. Moreover, our relative humidity reconstruction was correlated well with the corresponding grids MADA dataset in the public section during the common period. All of these have proved the accuracy of the reconstruction sequence in this paper.

Key words: southern Qinghai Plateau; tree-ring residual chronology; relative humidity; reconstruction